

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ХОЛОДНОЙ ОБЪЕМНОЙ ШТАМПОВКИ

Лавриненко В.Ю.

к.т.н., доц. кафедры «Машины и технология обработки металлов давлением»,

заведующий лабораторией САПР,

Московский государственный индустриальный университет (ГОУ МГИУ)

E-mail: lvq1@mail.msiu.ru

тел.: (495) 620-39-40

1. Общие сведения

В настоящее время при производстве крепежных деталей методами холодной объемной штамповки (ХОШ) весьма актуальными являются вопросы обеспечения высокого качества, прочности и надежности продукции, сокращения сроков внедрения в производство новых изделий и снижение затрат на производство.

Проектирование технологических процессов ХОШ крепежных деталей предполагает решение целого ряда сложных задач: определение напряженно-деформированного состояния; определение условий течения металла и прогнозирование структуры материала; оптимизация переходов штамповки и предотвращение возможности появления технологических отказов; определение сил штамповки, нагрузки и характера деформации инструмента и др.

Применение традиционных методов проектирования технологических процессов ХОШ и внедрения в производство не всегда позволяет решить перечисленные задачи и обеспечить оптимальное сочетание требуемого качества готовой детали и минимальных сроков и затрат на производство.

Одним из эффективных подходов к решению данных проблем является комплексное применение систем автоматизированного проектирования на основе передовых компьютерных технологий: CAD-систем проектирования и CAE-систем - программных комплексов автоматизированного инженерного анализа процессов объемной штамповки (eesy-2-form, eesy-form, DEFORM, SUPERFORG/SUPERFORM, MSC.SuperForge, FORGE, FINEL, QForm и др.).

Эти программы позволяют моделировать пластическое течение материала для горячих, полугорячих и холодных процессов, причем это могут быть как изотермические, так и неизотермические процессы. При расчете принимают во внимание все факторы, влияющие на процесс штамповки: конвекция, излучение, тепловыделение при фазовых переходах и пластических деформациях, выделение тепла при трении, потери тепла в зоне контакта между заготовкой и инструментом, влияние температуры на коэффициент трения и термо-механические характеристики материала, влияние давления на трение и т.д.

Есть возможность моделировать даже самые сложные технологические операции с участием сборных заготовок и любого количества инструментов. Инструмент может быть задан и абсо-

лютно жесткий, и упругий, деформируемый. Возможен расчет нескольких инструментов, а также учет предварительного натяга в составном инструменте.

Можно задать практически любое оборудование - гидравлические прессы, молоты, винтовые прессы, кривошипные прессы, прокатные станы и др.

Вышеперечисленные специализированные программные комплексы разработчиков предоставляют широкие возможности для обработки результатов, оценки процесса на наличие дефектов, анализа течения материала. Результаты включают графики сил и работ, поля распределения напряжений, деформаций и температуры, причем они могут быть представлены графически и таблично. Наглядно показаны макро- и микроструктура изделия, движение отдельных точек материала. Для создания отчетов результаты можно вывести в виде графиков, численных данных, твердых копий и анимации.

При использовании данных программных комплексов появляются возможности проверки и оптимизации геометрии инструмента, исходных размеров и материала заготовки, параметров оборудования, смазочного материала и других параметров технологического процесса до изготовления инструментальной оснастки и промышленной проверки новой технологии, что в значительной мере может снизить затраты на подготовку производства и внедрение новой технологии.

2. Примеры моделирования процессов холодной объемной штамповки в программном комплексе QForm

Главной отличительной особенностью отечественной автоматизированной системы анализа и проектирования процессов штамповки QForm и ее преимуществом перед зарубежными аналогами является то, что конечно-элементная база дискретной модели полностью скрыта от пользователя. Ему не приходится задавать ни количество элементов, ни их размеры, ни какие-либо характеристики, привязанные к углам или элементам.

Работу с программой выполняют путем задания технологических параметров. Для проведения расчета достаточно задать конфигурацию гравюры штампов и начальную форму заготовки, выбрать соответствующий материал заготовки, оборудование и смазку. Технологические свойства материала задаются кривыми сопротивления пласти-

ческой деформации в зависимости от скорости, степени и температуры деформации, а также теплофизическими свойствами. Оборудование характеризуется своими техническими параметрами (например, число оборотов кривошипа в минуту, величина рабочего хода и номинальная сила). Смазки задают коэффициентами трения и теплоотдачи.

Все дальнейшие вычисления проводятся полностью автоматически без какого-либо вмешательства со стороны пользователя. Программа генерирует сетку элементов с учетом особенностей геометрии для самых сложных случаев течения металла. Еще более мелкая сетка используется для решения тепловой задачи, чтобы обеспечить высокую точность вблизи контактной поверхности, где имеются большие градиенты температуры. Сетка элементов автоматически перестраивается на каждом шаге решения, что дает возможность наилучшим образом исследовать такие тонкие особенности процесса деформации как затекание металла в углы матрицы с малыми радиусами скруглений или в облой, а также предсказывать образование складок, прострелов, зажимов. Результаты расчета представляются в наглядной форме на экране дисплея, могут быть выведены на печать или экспортированы для использования другими программами.

Результаты расчета содержат:

- полную картину формоизменения в течение всего процесса деформирования, включая поля скоростей, напряжений, деформаций, скоростей деформации и температуру поковки;
- энергосиловые параметры процесса;
- Лагранжеву сетку;

- конечно-элементную сетку;
- распределение контактных напряжений на поверхности инструмента;
- предсказание возможности образования дефектов и анализ проработки металла и текстуры.

Система QForm обеспечивает моделирование пластической деформации заготовки и инструмента с возможностью выбора различных реологических моделей описания деформирования металлов (жесткий вязко-пластический материал, упруго-пластический материал, упругое вязко-пластическое тело). В программе при расчете течения металла заготовки по умолчанию используют модель жесткого вязко-пластического тела.

Для исследования влияния предварительной деформации исходного материала на силовые параметры при высадке крепежных деталей были проведены моделирование и анализ технологических процессов изготовления болта со звездобразной головкой (рис. 1) в программном комплексе QForm2D/3D.

Проведенные ранее исследования показали, что предварительное деформирование путем волочения в холодном состоянии вызывает повышение сопротивления деформации, причем повышение тем значительнее, чем больше степень обжатия при волочении. При последующем приложении нагрузки в направлении, противоположном предыдущему направлению, течение металла начинается при более низких напряжениях по сравнению с теми, которые были в момент прекращения нагрузки при предварительном деформировании [3, 4].

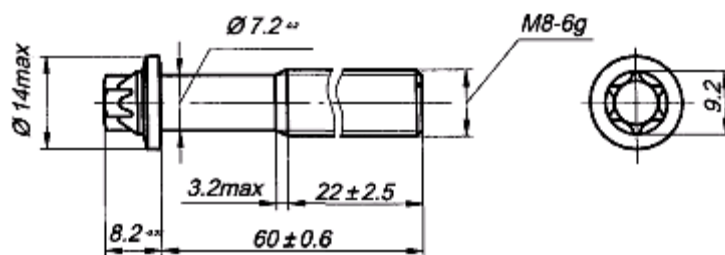


Рис. 1. Болт со звездобразной головкой

Технологический процесс изготовления болта состоит из 4-х переходов (рис. 2). После отрезки заготовки (рис. 2, а) на 3-х предварительных

переходах производят операции редуцирования стержня, а также предварительной высадки головки болта и осадки фланца (рис. 2, б, в, г).

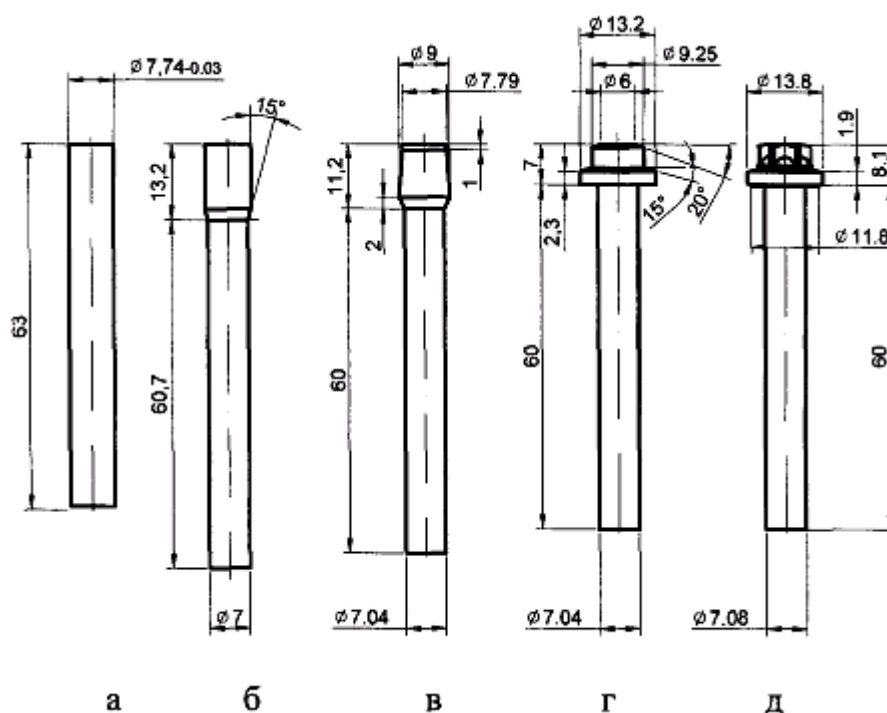


Рис. 2. Технологические переходы штамповки болта со звездообразной головкой

На окончательном переходе штамповки производят формирование сложного профиля звездообразной головки (рис.2, д), поэтому при моделировании окончательной штамповки рассматривали трехмерное течение металла заготовки.

Таким образом, для моделирования данного технологического процесса использовали программу QForm2D/3D версии 4.1, в которой интеграция двумерного и трехмерного моделирования обеспечивает формирование единой технологической цепочки.

Подготовку к моделированию выполняли путем задания технологических параметров процесса:

- геометрия исходной заготовки и рабо-

чего инструмента по переходам;

- оборудование;
- смазочный материал;
- материал заготовки.

В качестве материала заготовки была выбрана сталь 30Г1Р в двух исходных состояниях:

- после сфероидизирующего отжига (исходная степень деформации $\epsilon = 10\%$);
- предварительно деформированное состояние (степень деформации при волочении $\epsilon = 10\%$).

На рис. 3 представлены диаграммы деформирования стали 30Г1Р в отожженном и предварительно деформированном состоянии.

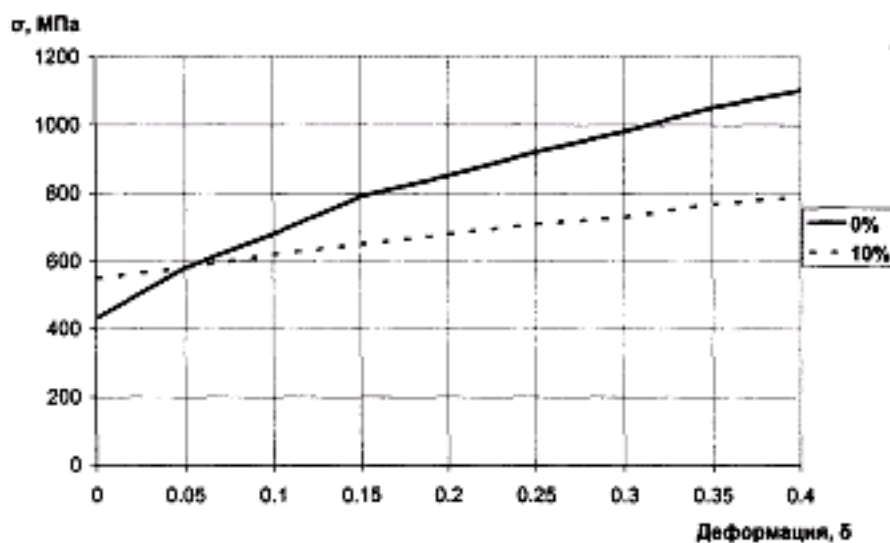


Рис. 3. Диаграммы деформирования стали 30Г1Р с различными степенями предварительной деформации

На рис. 4 представлены графики сил штамповки по переходам для двух вариантов предвари-

тельного состояния исходного материала.

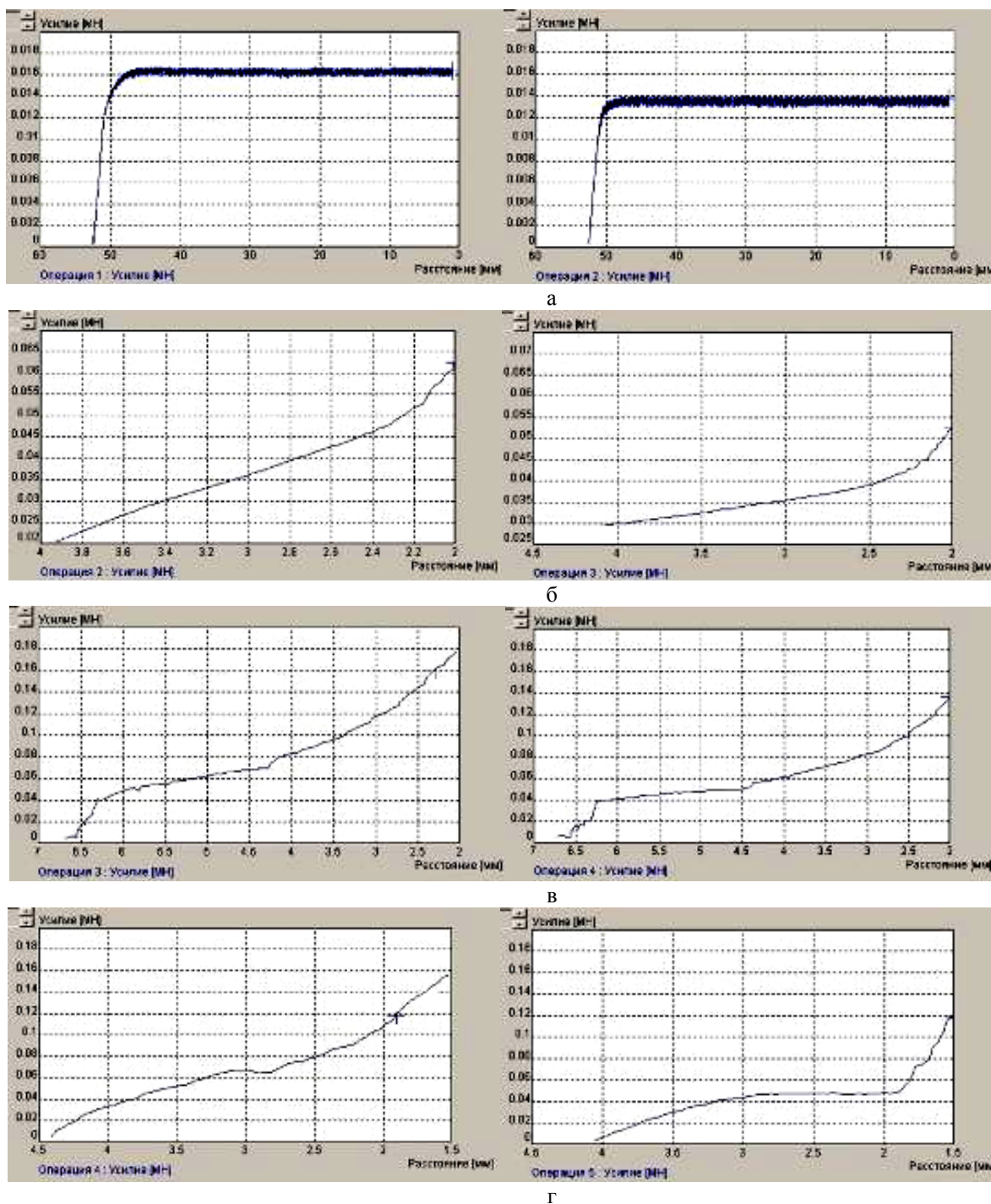


Рис. 4. Силы штамповки по переходам:
а - первый переход; б - второй переход; в - третий переход;
г - окончательный переход

На рис. 5 представлено распределение полей деформации по переходам высадки болта.

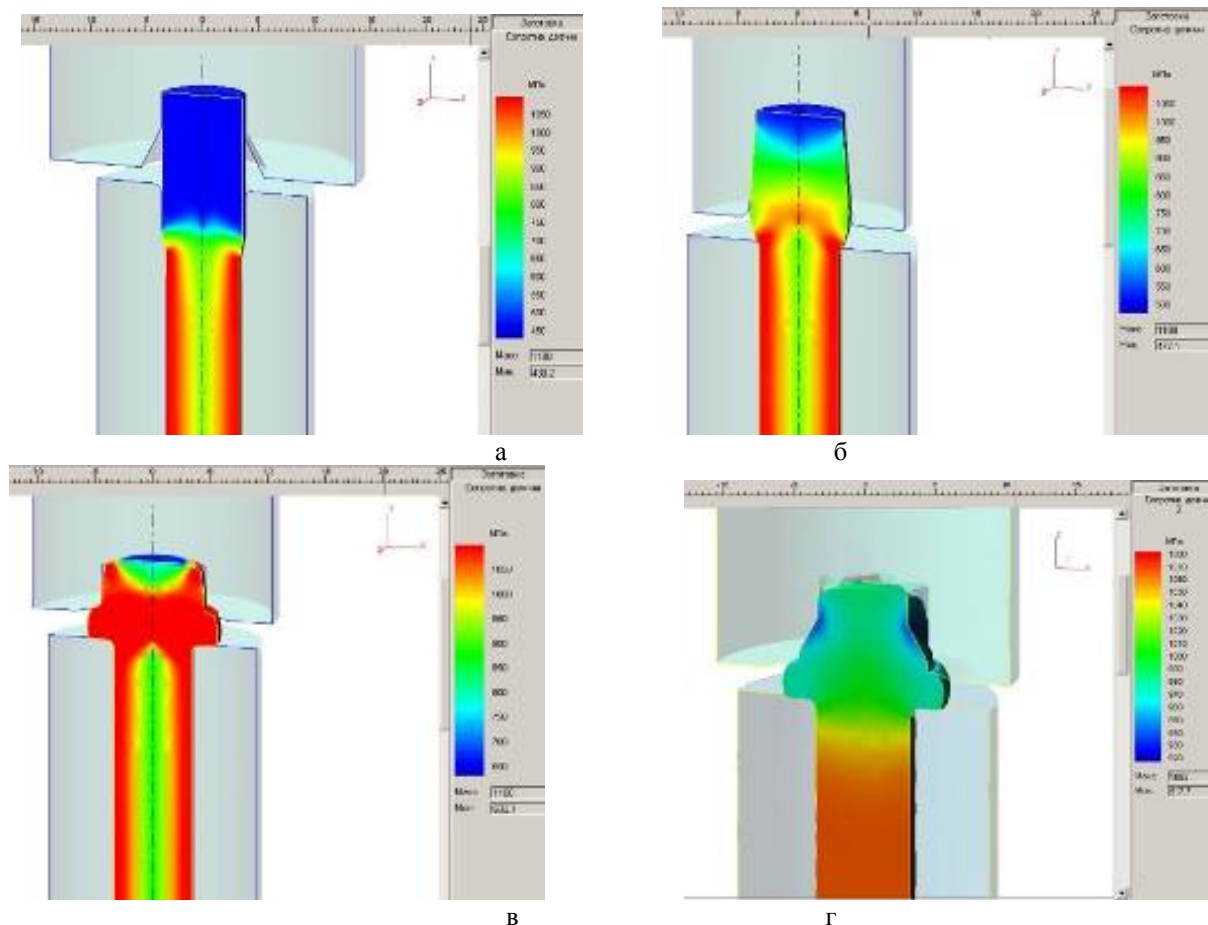


Рис. 5. Распределение полей деформации по переходам высадки болта:
а - первый переход; б - второй переход; в - третий переход;
г - окончательный переход

Проанализировав результаты моделирования, можно отметить, что в случае, когда предварительная деформация исходного материала была равной 0%, суммарная потребная сила деформирования составила 0,419МН; при предварительной деформации исходного материала 10% суммарная потребная сила деформирования была равна 0,326МН.

Таким образом, уменьшение суммарной силы деформирования при использовании стали 30Г1Р в предварительно деформированном состоянии составило примерно 20%.

Также было проведено компьютерное моделирование однопереходной высадки поволоков типа стержня с шаровой головкой в программе QForm

3D v.3.2 с целью исследования распределения волокнистого строения по конфигурации поковки в зависимости от технологических параметров.

На рис. 6, а показана исходная заготовка после отрезки от прутка с ровным торцом и заготовка со скошенным торцом (рис. 6, б). Волокна макроструктуры направлены вдоль продольной оси заготовки.

На рис. 7-8 представлены результаты компьютерного и физического моделирования однопереходной высадки поволоков типа стержня с шаровой головкой, показывающие распределение волокнистого строения (волокнистое строение моделируют вертикальные Лагранжевы линии).

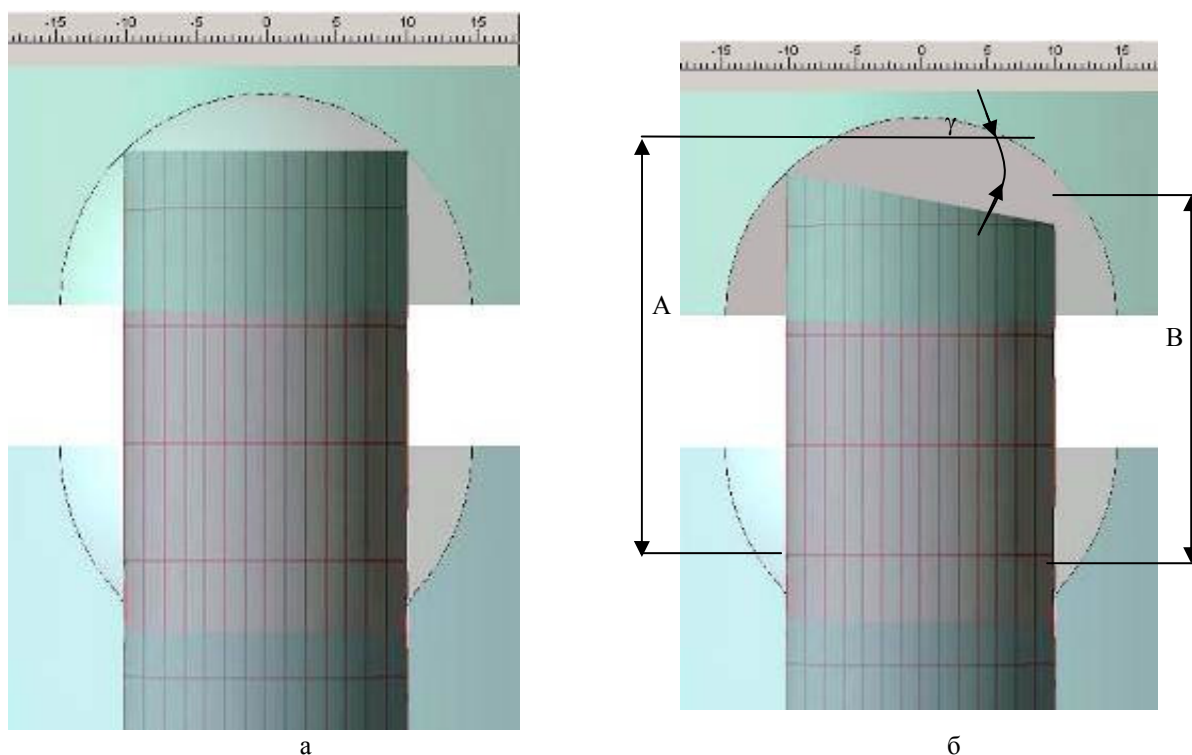


Рис. 6. Исходная заготовка:
а – заготовка с ровным торцем; б – заготовка со скошенным торцем с углом γ ;
А – «длинная» сторона заготовки, В – «короткая» сторона заготовки

Сопоставляя волокнистое строение, полученное при компьютерном моделировании с макрошлифами полученных поковок (рис. 7 - 8), необходимо отметить следующие особенности.

При моделировании высадки поковок с величинами относительной высаживаемой длины $\psi = 2.2$ и $\psi = 2.5$ при $\gamma = 0^\circ$ и $\gamma = 2^\circ$ наблюдали почти полное соответствие линий волокнистого строения поковок макроструктуре, полученной при реальном процессе высадки. Линии волокнистого строения плавные, без разрывов и резких изломов, огибают боковую поверхность шаровой головки (рис. 7 а, б, д, е и рис. 8 а, б, д, е).

Однако при больших значениях угла скоса торца заготовки ($\gamma = 4^\circ$ и 6°) (рис. 7 в, г, ж, з и рис. 8 в, г, ж, з) имело место значительно большее, чем при реальном процессе, незаполнение полостей пуансона и матрицы и образование одностороннего заусенца, вследствие чего наблюдали некоторое расхождение реальных линий волокнистого строения и Лагранжевых линий при компьютерном моделировании.

Это говорит о необходимости учета дополнительных данных и допущений для компьютерного моделирования однопереходной высадки поковки типа стержня с шаровой головкой из заготовок со скошенным торцем.

Проанализировав результаты компьютерного моделирования, можно сделать вывод о том, что при однопереходной высадке поковок с шаровой головкой с величиной относительной высаживаемой длины $\psi \leq 2.7$ при значениях угла скоса торца $\gamma \leq 2^\circ$ заготовки удастся получить благоприятное волокнистое строение шаровой головки относительно ее боковой поверхности и верхней части.

Сравнивая волокнистое строение, полученное в результате компьютерного моделирования и макроструктуру поковок с шаровыми головками, полученных при экспериментальной штамповке, можно отметить большую сходимость результатов и соответствие компьютерного моделирования в программе QForm реальному процессу высадки поковок с шаровой головкой.

$$\psi = 2.2$$

$$\psi = 2.5$$

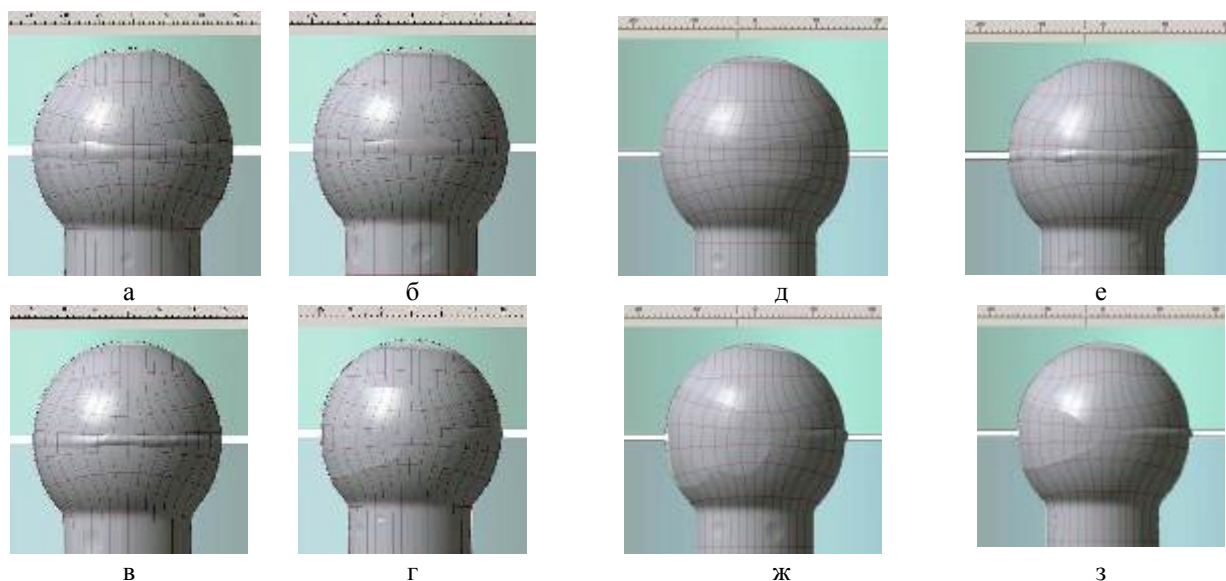


Рис. 7. Компьютерное моделирование однопереходной высадки поковок типа стержня с шаровой головкой ($\psi = 2.2$ и $\psi = 2.5$): угол скоса торца заготовки: а, д -0° ; б, е -2° ; в, ж -4° ; г, з -6°

3. Пример моделирования процесса холодной объемной штамповки в программном комплексе eesy-2-form

Eesy-2-form - специализированная программа моделирования и анализа процессов холодной высадки крепежных деталей (болты, винты, гайки) и других фасонных деталей компании CPM GmbH (Германия).

Данная программа позволяет проводить моделирование пластического течения материалов при любых технологических процессах.

Результаты расчета включают графики сил и работ, поля распределения напряжений, деформаций и температуры, распределение линий макроструктуры и т.д..

Результаты моделирования можно вывести в виде графиков, таблиц, твердых копий и анимации.

Для исследования особенностей формоизменения и определения возможных технологических отказов было проведено моделирование и анализ технологического процесса изготовления гайки крепления колеса (рис. 9) в программном комплексе eesy-2-form.

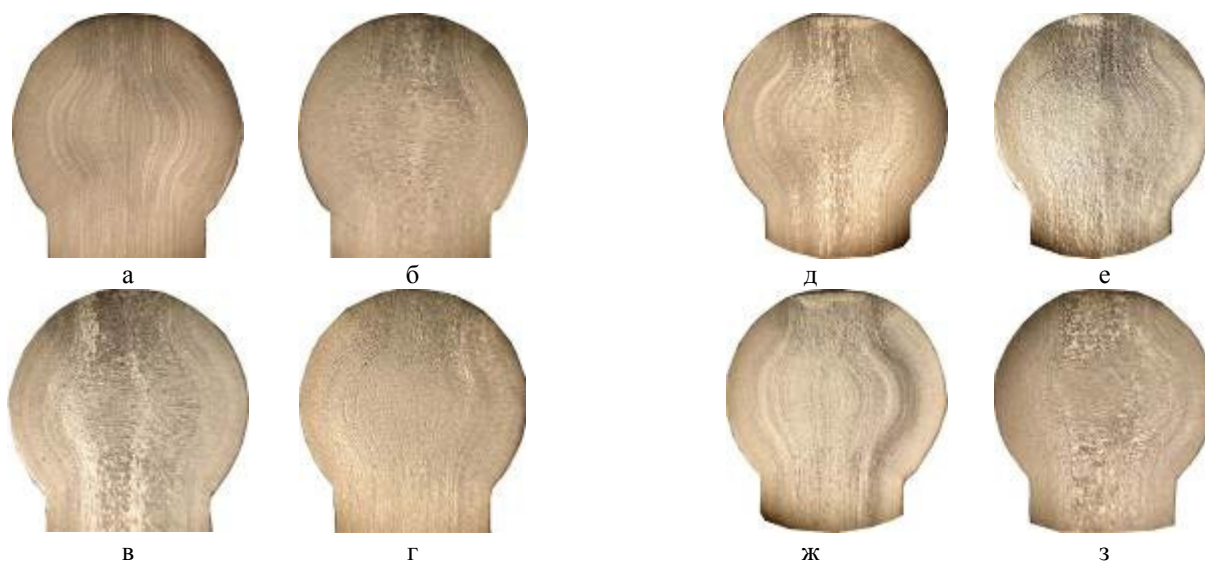


Рис. 8. Макроструктура поковок, высаданных за один переход ($\psi = 2.2$ и $\psi = 2.5$): угол скоса торца заготовки: а, д -0° ; б, е -2° ; в, ж -4° ; г, з -6°

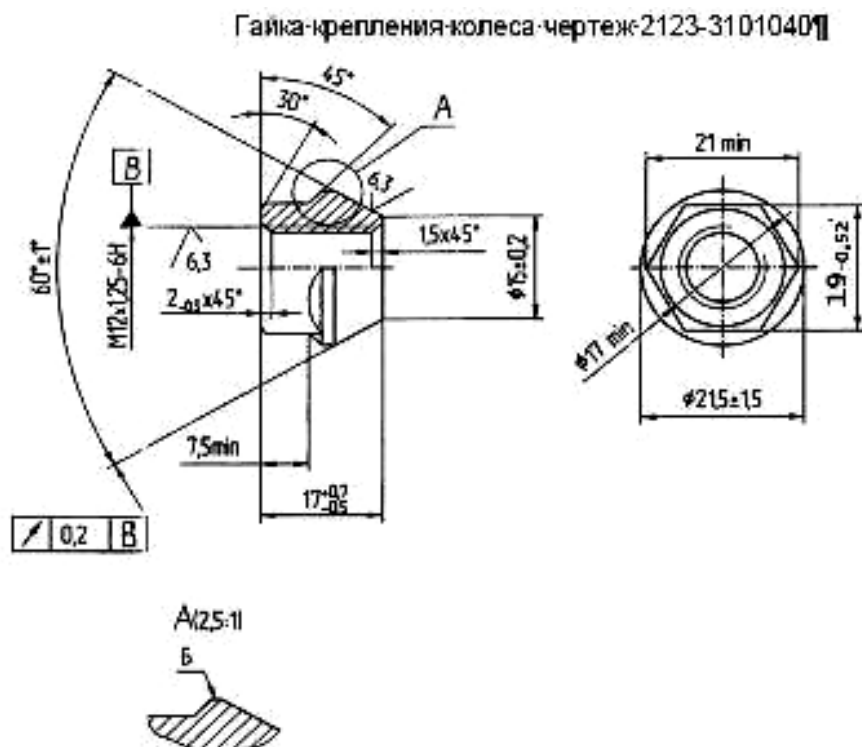


Рис. 9. Гайка крепления колеса

Технологический процесс изготовления гайки состоит из 5-х переходов (рис. 10). После отрезки заготовки на 3-х предварительных переходах производят операции предварительного и окончательного формирования наружного шестигранника и углублений под прошивку. На последнем переходе производят окончательную прошивку отверстия под накатку резьбы.

Подготовку к моделированию выполняли путем задания технологических параметров процесса:

- геометрия исходной заготовки и рабочего инструмента по переходам;
- тип оборудования - кривошипный пресс;
- смазочный материал для холодной объемной штамповки - из базы данных программы;
- материал заготовки - сталь 12Г1Р.

На рис. 11 - 15 представлены некоторые результаты моделирования.

Технологические операции				
Холодная высадка заготовки				
Отрезка заготовки	Выравнивание торцов	Предварительная высадка шестигранника	Окончательная высадка шестигранника	Прошивка отверстия

Рис. 10. Технологические переходы штамповки гайки крепления колеса

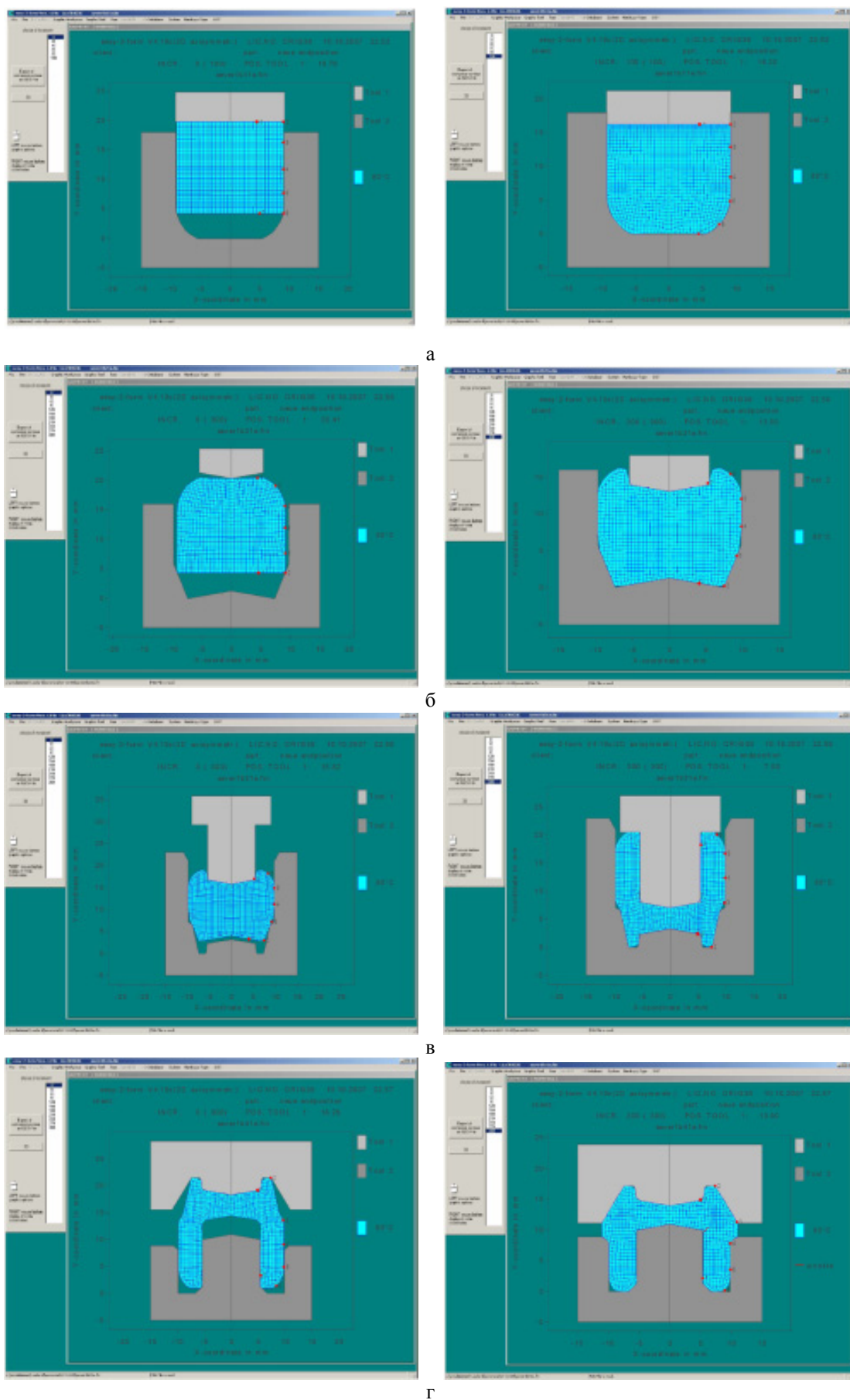


Рис. 11. Результаты моделирования процесса штамповки гайки крепления колеса: а - 1-й переход; б - 2-й переход; в - 3-й переход; г - 4-й переход

На 4-м переходе штамповки (рис. 11, г и рис. 12) отчетливо видно образование зажима (красная линия) в средней внутренней части заго-

товки, приводящего при последующей накатке внутренней резьбы к браку гайки: -незаполнению нескольких витков резьбы.

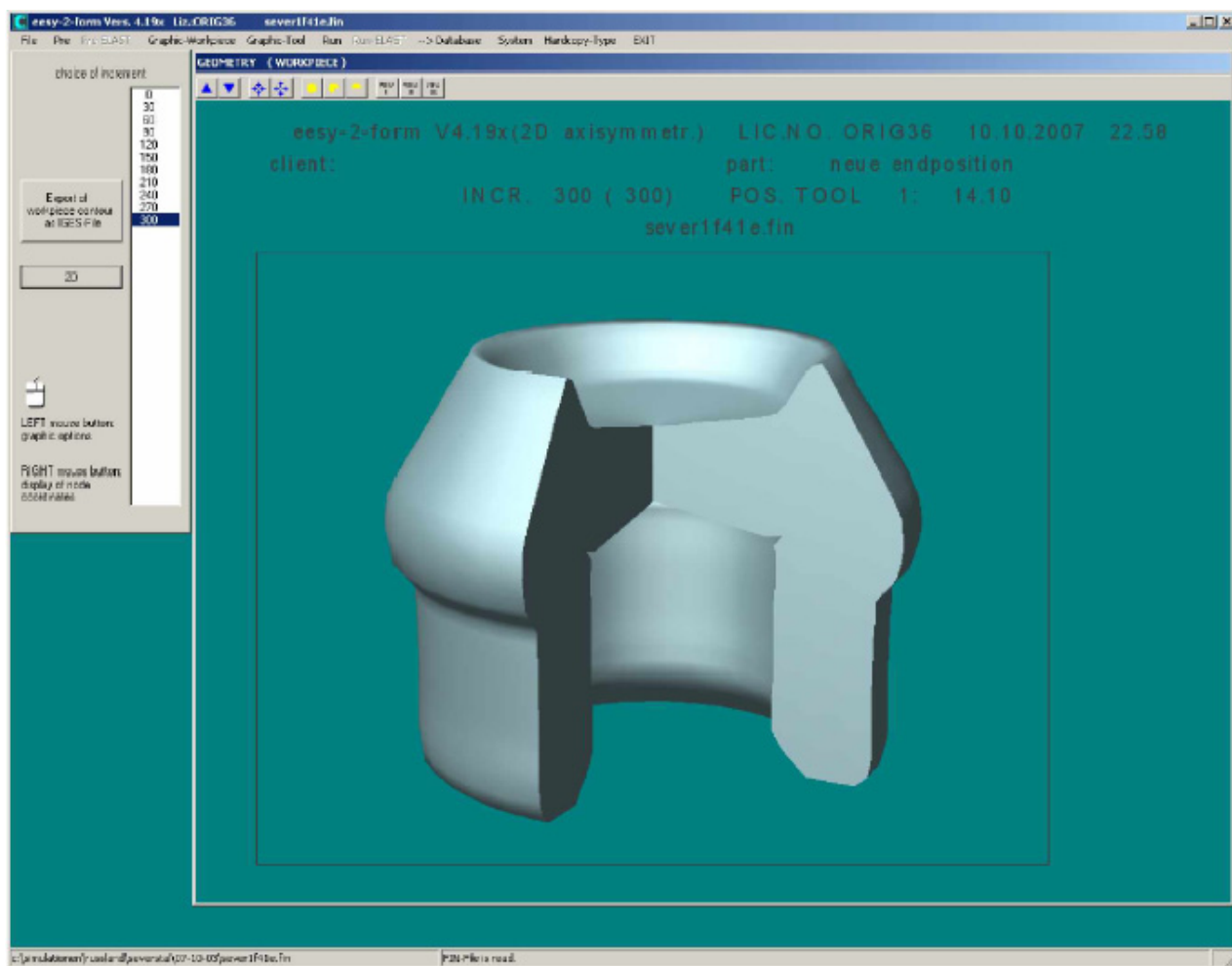


Рис. 12. 4-й переход штамповки гайки с внутренним дефектом

Для устранения данного дефекта была проведена оптимизация геометрии пуансона на 3-м переходе штамповки путем добавления конической части в верхней части пуансона. Результаты моделирования оптимизированных 3-го и 4-го переходов штамповки представлены на рис. 13. На 4-м переходе штамповки (рис.13, г) можно наблюдать отсутствие дефекта в виде зажима.

На рис. 14 представлено распределение полей деформации по сечению гайки на 4-м переходе, а на рис. 15 - распределение линий волокнистого строения по сечению гайки на 4-м переходе штамповки.

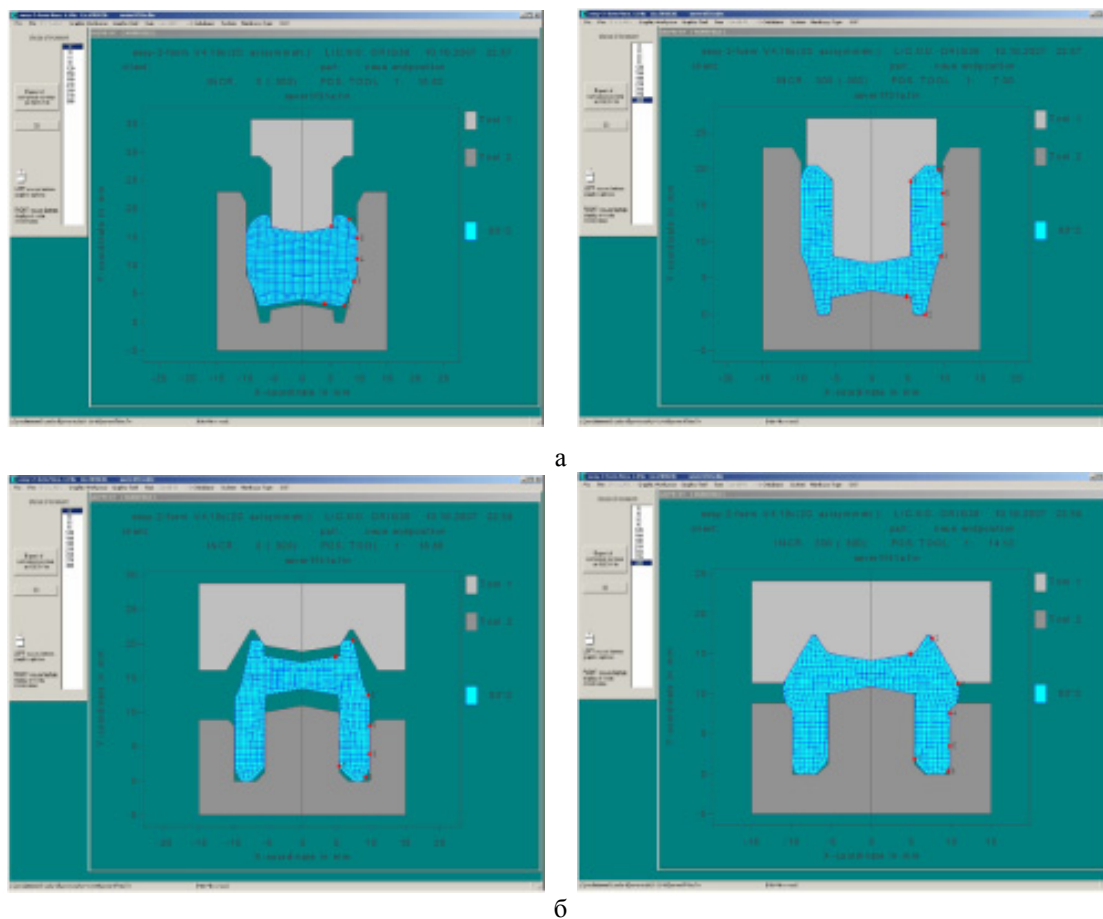
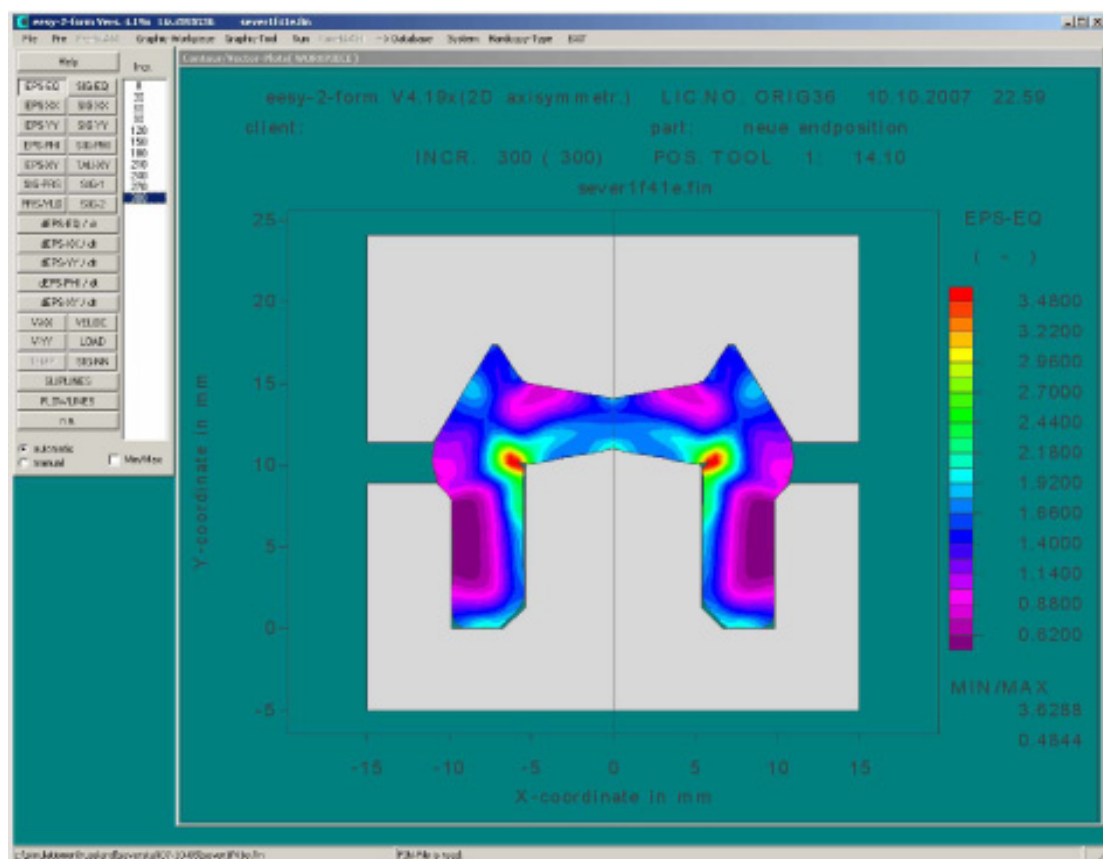


Рис. 13. Результаты моделирования оптимизированного процесса штамповки:
а - 3-й переход; б - 4-й переход



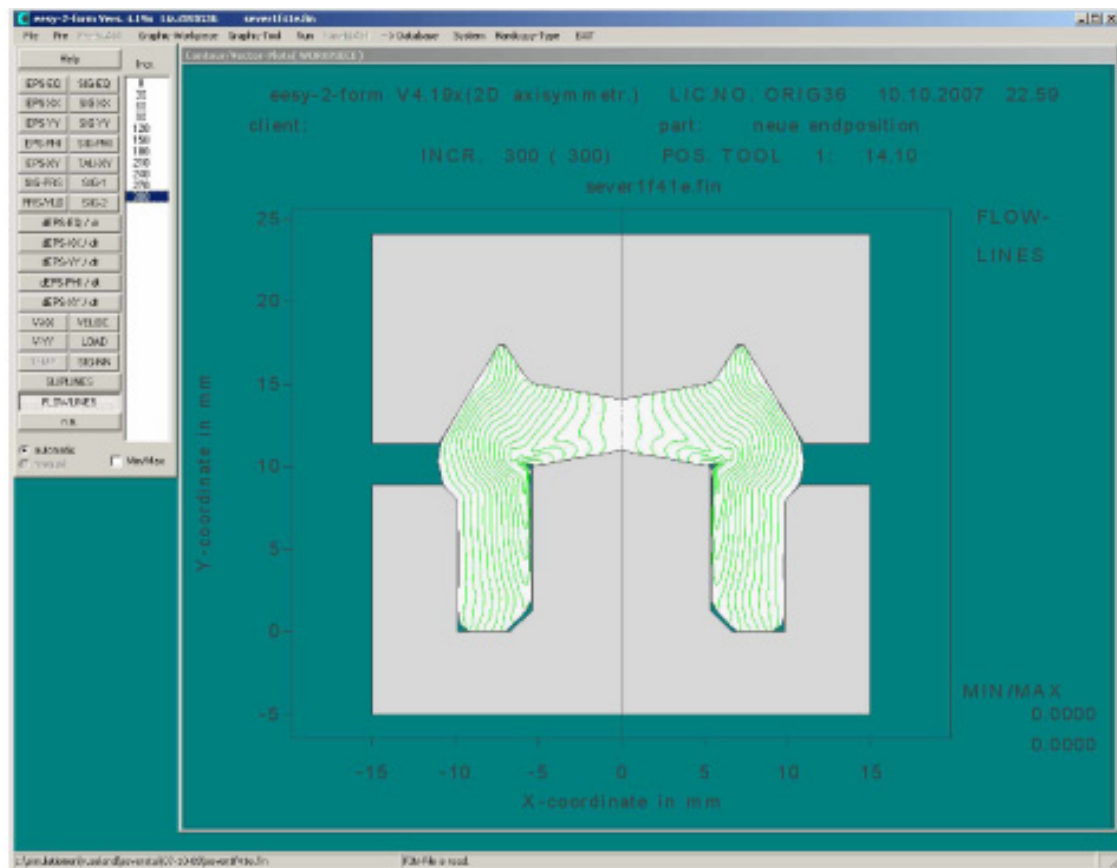


Рис. 15. Распределение линий волокнистого строения по сечению гайки на 4-м переходе

Таким образом, применение специализированного программного комплекса eesy-2-form для моделирования технологических процессов холодной объемной штамповки позволяет быстро и с высокой степенью точности определять основные параметры процессов, наличие возможных дефектов и т.п. и проводить оптимизацию технологии с небольшими затратами ресурсов и времени.